

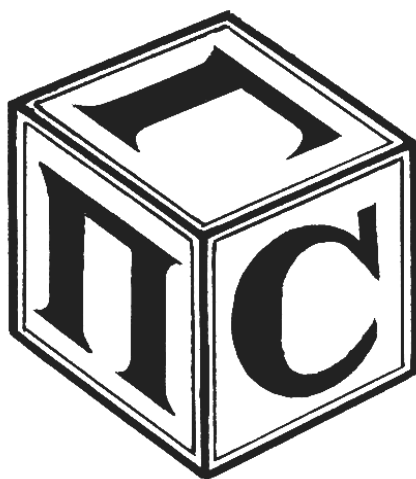
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений»
очной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2025

УДК 674.012.45
ББК 38.5
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«27» февраля 2025 г., протокол № 9

Составители: ст. преподаватель И. И. Мельянцова;
канд. техн. наук, доц. В. С. Михальков

Рецензент ст. преподаватель Н. В. Курочкин

Приведены рекомендации по выбору марок сталей для конструкций, оценке свариваемости сталей, расчету сварных и болтовых соединений, даны примеры расчета стыка балки на высокопрочных болтах и расчета прочности стыков балки для студентов специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений».

Учебное издание

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Часть 1

Ответственный за выпуск	С. В. Данилов
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Выбор марок сталей для конструкций.....	5
2 Оценка свариваемости сталей.....	7
3 Конструирование и расчет сварных соединений.....	11
4 Конструирование и расчет болтовых соединений.....	20
5 Конструирование и расчет стыка балки на высокопрочных болтах.....	25
6 Проверка прочности стыков балки.....	29
Список литературы.....	32

Введение

Методические рекомендации разработаны в соответствии с требованиями действующих ТНПА по проектированию стальных конструкций СП 5.04.01–2021 *Стальные конструкции*.

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» всех форм обучения при проведении практических занятий по учебной дисциплине и для самостоятельной работы студентов.

Материал методических рекомендаций рассчитан на получение практических навыков начального этапа освоения основ проектирования и расчета металлических конструкций и их соединений.

При использовании методических рекомендаций в процессе выполнения практических работ студентам целесообразно проверить действие технических нормативных правовых актов (ТНПА), обращая внимание на изменения и поправки к ним (при их наличии). Перечень действующих ТНПА доступен на <https://normy.by> и <https://tnpa.by>.

1 Выбор марок сталей для конструкций

В соответствии с [1] в зависимости от назначения, условий работы и наличия соединений конструкции подразделяют на четыре группы:

– группа 1: сварные конструкции или их элементы, работающие в особо тяжелых условиях, в том числе максимально стесняющих развитие пластических деформаций, или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (балки крановых путей; балки рабочих площадок; балки путей подвесного транспорта; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузки от подвижных составов; главные балки и ригели рам при динамической нагрузке; пролетные строения транспортерных галерей; фасонки ферм; стенки, окрайки днищ, кольца жесткости, плавающие крыши, покрытия резервуаров и газгольдеров; бункерные балки; оболочки параболических бункеров; стальные оболочки свободно стоящих дымовых труб; сварные специальные опоры больших переходов ВЛ высотой более 60 м; элементы оттяжек мачт и оттяжечных узлов);

– группа 2: сварные конструкции или их элементы, работающие при статической нагрузке при наличии растягивающих напряжений (фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий; косоуры лестниц; оболочки силосов; опоры ВЛ, за исключением сварных опор больших переходов; опоры ошиновки ОРУ подстанций; опоры транспортерных галерей; прожекторные мачты; элементы комбинированных опор антенных сооружений и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 1 при отсутствии сварных соединений и балки подвесных путей при наличии сварных монтажных соединений;

– группа 3: сварные конструкции или их элементы, работающие при статической нагрузке, преимущественно на сжатие (колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование; вертикальные связи по колоннам с напряжениями в расчетных сечениях связей свыше $0,4f_{yd}$; анкерные, несущие и фиксирующие конструкции (опоры, ригели жестких поперечин, фиксаторы) контактной сети транспорта; опоры под оборудование ОРУ, кроме опор под выключатели; элементы стволов и башен антенных сооружений; колонны бетоновозных эстакад; прогоны покрытий и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 2 при отсутствии сварных соединений;

– группа 4: вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в группе 3; элементы фахверка; лестницы; трапы; площадки; ограждения; металлоконструкции кабельных каналов; вспомогательные элементы сооружений и т. п.), а также конструкции и их элементы группы 3 при отсутствии сварных соединений.

При назначении стали для конструкций зданий повышенного уровня ответственности номер группы конструкций уменьшают на единицу (для групп 2–4). При толщине проката $t > 40$ мм номер группы конструкций уменьшают на единицу (для групп 2–4); при толщине проката $t \leq 6$ мм – увеличивают на единицу

(для групп 1–3).

Рекомендуемые марки стали для групп 1–4 конструкций приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемые марки сталей для групп конструкций зданий и сооружений

Марка стали		Условие применения при расчетной температуре $t \geq -45^\circ\text{C}$ для группы конструкций			
		1	2	3	4
C235	Ст3кп2 Ст3пс2	–	–	+ ^{1),2)}	+
C245	Ст3пс6	–	+ ³⁾	×	×
C255	Ст3сп5 Ст3Гпс6	+	×	×	–
C285	Ст3сп5	+	×	×	–
C345	09Г2С	$\frac{3}{12}$	$\frac{1}{4}$ ⁴⁾	$\frac{1}{4}$ ⁴⁾	×
C375	10Г2С	+	×	–	–
¹⁾Кроме опор ВЛ, ОРУ и контактных сетей. ²⁾Кроме районов с расчетной температурой $-30^\circ\text{C} > t \geq -40^\circ\text{C}$ для неотапливаемых зданий и конструкций. ³⁾Для районов с расчетной температурой $-30^\circ\text{C} > t \geq -40^\circ\text{C}$ для неотапливаемых зданий и конструкций применяют прокат толщиной не более 10 мм. ⁴⁾Кроме специальных сооружений: магистральных и технологических трубопроводов, резервуаров специального назначения, кожухов доменных печей и воздухонагревателей и т. п. Стали для этих конструкций устанавливают соответствующими ТНПА					
<i>Примечание</i> – Обозначения, принятые в таблице: (+) – данную сталь применяют; (–) – данную сталь применять не рекомендуется; (×) – разрешается применять при соответствующем технико-экономическом обосновании. Для стали марок С345 и 09Г2С приведены категории требований по ударной вязкости: в числителе – по ГОСТ 27772–2015, в знаменателе – по ГОСТ 19281–2014. Прокат из стали с характеристическим значением предела текучести $f_{yk} \geq 390 \text{ Н/мм}^2$ назначают исходя из [1, таблицы А.1 и А.2]					

При назначении стали для конструкций зданий и сооружений учитывают группы конструкций, требования к химическому составу и показателю ударной вязкости, приведенные в [1, приложение А].

Выбор стали для стальных конструкций производят на основе вариантного проектирования и технико-экономического анализа с учетом требований норм. В целях упрощения заказа металла при выборе стали следует стремиться к большей унификации конструкций, сокращению количества сталей и профилей. Выбор стали зависит от следующих факторов, влияющих на работу материала:

- температуры среды, в которой монтируется и эксплуатируется конструкция. Этот фактор учитывает повышенную опасность хрупкого разрушения при пониженных температурах;
- характера нагружения, определяющего особенность работы материала и

конструкций при динамической, вибрационной и переменной нагрузках;

- вида напряженного состояния (одноосное сжатие или растяжение, плоское или объемное напряженное состояние) и уровня возникающих напряжений (сильно или слабо нагруженные элементы);

- способа соединения элементов, определяющего уровень собственных напряжений, степень концентрации напряжений и свойства материала в зоне соединения;

- толщины проката, применяемого в элементах. Этот фактор учитывает изменение свойств стали с увеличением толщины.

Окончательный выбор стали в пределах каждой группы должен выполняться на основании сравнения технико-экономических показателей (расхода стали и стоимости конструкций), а также с учетом заказа металла и технологических возможностей завода-изготовителя. В составных конструкциях (например, составных балках, фермах и т. п.) экономически целесообразно применение двух сталей – более высокой прочности для сильно нагруженных элементов (пояса ферм, балок) и меньшей прочности для слабо нагруженных элементов (решетка ферм, стенки балок).

Приведенный подход к выбору сталей используют для конструкций массового применения. Для особо ответственных уникальных сооружений с высокой степенью обеспеченности надежности (атомные реакторы АЭС, сосуды давления, газгольдеры и резервуары большого объема) требования к качеству, а следовательно, и к выбору стали могут быть значительно более жесткими.

Задание для выполнения практической работы

На основании вышеизложенного материала обосновать выбор стали для изготовления стропильной фермы, выполненной из прокатной трубы, эксплуатирующейся при расчетной температуре минус 25 °С.

2 Оценка свариваемости сталей

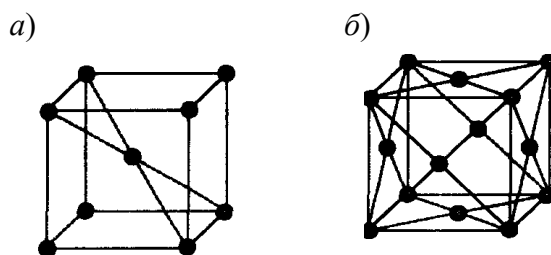
Сталь – это сплав железа с углеродом, содержащий легирующие добавки, улучшающие качество металла, и вредные примеси, которые попадают в металл из руды или образуются в процессе выплавки.

В твердом состоянии сталь является поликристаллическим телом, состоящим из множества различно ориентированных кристаллов (зерен). В каждом кристалле положительно заряженные ионы расположены упорядоченно в узлах пространственной решетки.

Для стали характерны кубические кристаллические объемноцентрированная и гранецентрированная решетки (рисунок 2.1).

Структура низколегированных сталей аналогична структуре малоуглеродистой стали. Низколегированные стали тоже содержат мало углерода, повышение их прочности достигается легированием – добавками, которые, как правило, находятся в твердом растворе с ферритом и, растворяясь, упрочняют его.

Легирующие добавки образуют карбиды и нитриды, также упрочняющие ферритовую основу и способствующие образованию мелкозернистой структуры.



a – объемноцентрированная; *b* – гранецентрированная

Рисунок 2.1 – Кубическая кристаллическая решетка

Рассмотрим основные химические элементы, применяемые при легировании.

Углеродистая сталь обыкновенного качества состоит из железа и углерода с некоторой добавкой кремния или алюминия, марганца, меди.

Углерод (У), повышая прочность стали, снижает ее пластичность и ухудшает свариваемость, поэтому в строительных сталях, которые должны быть достаточно пластичными и хорошо свариваемыми, углерод допускается в количестве не более 0,22 %.

Кремний (С) повышает прочность стали, ухудшает ее свариваемость и стойкость против коррозии. В малоуглеродистых сталях кремний применяется как хороший раскислитель; в малоуглеродистые стали добавляется до 0,3 % кремния, в низколегированные – до 1 %.

Алюминий (Ю) хорошо раскисляет сталь, нейтрализует вредное влияние фосфора, повышает ударную вязкость.

Марганец (Г) повышает прочность и вязкость стали, хороший раскислитель, соединяясь с серой, снижает ее вредное влияние. В малоуглеродистых сталях марганца содержится до 0,64 %, в легированных – до 1,5 %; при содержании марганца более 1,5 % сталь становится хрупкой.

Медь (Д) несколько повышает прочность стали и увеличивает стойкость ее против коррозии. Избыточное содержание (более 0,7 %) способствует старению стали.

Молибден (М) и бор (Р) обеспечивают высокую устойчивость аустенита при охлаждении, что очень важно для получения высокопрочного проката больших толщин. После закалки и высокого отпуска сталь становится мелкозернистой, насыщенной карбидами. Такая сталь обладает высокой прочностью, удовлетворительной пластичностью и почти не разупрочняется при сварке.

Примечание – При обозначении марки стали каждому химическому элементу присвоена буква русского алфавита (указана в скобках около каждого элемента), содержание каждого элемента в процентах с округлением до целых значений указывается после буквы, обозначающей данный элемент (элемент, содержащийся в пределах 1 %, цифрами не указывается). Поскольку углерод содержится во всех сталях, его обозначение (буква У) не ставится, а количественное содержание указывается в сотых долях процента в начале обозначения марки. Так, 15Г2СФ означает, что в этой стали среднее содержание углерода 0,15 %, марганца – в пределах 1 %...2 %, кремния и ванадия – в пределах 1 % каждого.

Азот (А) в несвязанном состоянии способствует старению стали и делает ее хрупкой, особенно при низких температурах. Его не должно быть более 0,008 %.

Повышение механических свойств низколегированной стали осуществляется также присадкой металлов: марганец (Г), хром (Х), ванадий (Ф), вольфрам (В), молибден (М), титан (Т).

Вольфрам и молибден, значительно повышая твердость, снижают пластические свойства стали.

Вредные примеси: фосфор – повышает хрупкость стали, особенно при пониженных температурах (хладоломкость), и снижает пластичность при повышенных; сера – делает сталь красноломкой (склонной к образованию трещин при температуре 800 °С...1000 °С). Поэтому содержание серы и фосфора в стали ограничивается: так, в углеродистой стали Ст3 серы должно быть не больше 0,05 % и фосфора – 0,04 %.

Вредное влияние на механические свойства стали оказывает насыщение ее газами, которые могут попасть из атмосферы в металл, находящийся в расплавленном состоянии. Кислород повышает хрупкость стали, несвязанный азот также снижает качество стали, водород (всего 0,0007 %) вызывает в микрообъемах высокие напряжения, что приводит к снижению сопротивления стали хрупкому разрушению, снижению временного сопротивления и ухудшению пластических свойств. Поэтому расплавленную сталь (например, при сварке) необходимо защищать от воздействия атмосферы.

Значительного повышения прочности, деформационных и других свойств стали, помимо легирования, достигают термической обработкой. Под влиянием температуры, а также режима нагрева и охлаждения изменяются структура, величина зерна и растворимость легирующих элементов стали.

Простейшим видом термической обработки является нормализация. Она заключается в повторном нагреве проката до температуры образования аустенита и последующего охлаждения на воздухе. После нормализации структура стали получается более упорядоченной, снимаются внутренние напряжения, что приводит к улучшению прочностных и пластических свойств стального проката и его ударной вязкости.

В состав легированных сталей, помимо железа и углерода, входят специальные добавки, улучшающие их качество. Поскольку большинство добавок в той или иной степени ухудшают свариваемость стали, а также удорожают ее, в строительстве в основном применяют низколегированные стали с суммарным содержанием легирующих добавок не более 5 %.

Оценку свариваемости стали проводят по углеродному эквиваленту C_e (в процентах):

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V + Nb}{14} + \frac{Mo}{4} + \frac{P}{2}, \quad (2.1)$$

где C, Mn, Si, Ni, Cr, Cu, V, Nb, Mo, P – массовые доли элементов, %.

Согласно ГОСТ 4543–2016 наименование марок конструкционных легированных сталей состоит из цифр и буквенного обозначения химических элементов.

Цифры перед буквенным обозначением указывают среднюю массовую долю углерода С в сотых долях процента. Химические элементы обозначены следующими буквами: В – вольфрам W, Г – марганец Mn, М – молибден Mo, Н – никель Ni, Р – бор В, С – кремний Si, Ф – ванадий V, Х – хром Cr, Ю – алюминий Al.

Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в целых единицах. Отсутствие цифры означает, что в стали содержится до 1,5 % этого легирующего элемента. Допускается значение C_s не более 0,45 % при характеристическом значении предела текучести стали f_{yk} до $390 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; при f_{yk} до $490 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ – 0,46 %. При $C_s < 0,2$ % – свариваемость хорошая; при $0,2 \% \leq C_s < 0,35$ % – свариваемость удовлетворительная; при $0,35 \% \leq C_s < 0,45$ % – свариваемость ограниченная.

Примеры

Пример 1 – Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости стали 12ХН.

Решение

Для определения оценки свариваемостей определяем углеродный эквивалент:

$$C_s = 0,12 + \frac{1}{5} + \frac{1}{40} = 0,345 \text{ \%}.$$

Свариваемость удовлетворительная.

Пример 2 – Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости стали 13ХФА.

Решение

Для определения оценки свариваемостей определяем углеродный эквивалент:

$$C_s = 0,13 + \frac{1}{5} + \frac{1}{14} = 0,401 \text{ \%}.$$

Свариваемость ограниченная.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости стали 15Х2ГМФ.

Задача 2. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости стали 19ХГН.

Задача 3. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости стали 35ХГФ.

3 Конструирование и расчет сварных соединений

Расчет стыковых сварных швов

Напряжения в прямом стыковом сварном шве (рисунок 3.1), работающем на растяжение или сжатие, определяются по формуле

$$\frac{N_{Ed}}{t \cdot l_w} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (3.1)$$

где N_{Ed} – расчетное значение осевого усилия (продольная сила);

t – наименьшая толщина соединяемых элементов;

l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на $2t$ или его полной длине в случае вывода концов шва за пределы стыка;

f_{wy} – расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на растяжение, сжатие, изгиб по пределу текучести; $f_{wy} = f_{yd}$ при физических методах контроля шва и $f_{wy} = 0,85f_{yd}$ – при обычных методах контроля;

γ_c – коэффициент условий работы.

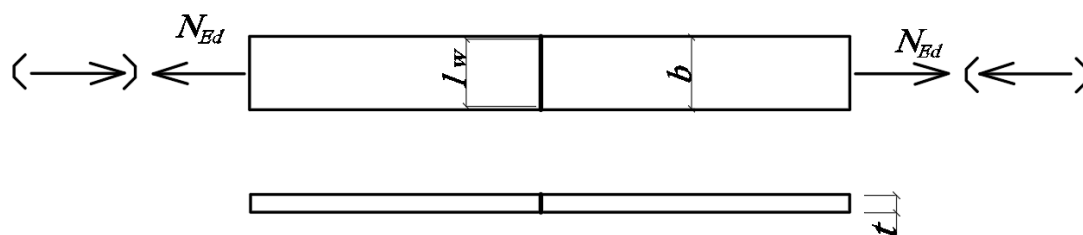


Рисунок 3.1 – Прямой стыковой сварной шов

Напряжения в косом стыковом сварном шве (рисунок 3.2), работающем на растяжение или сжатие, рассчитываются по формуле

$$\frac{N_{Ed} \cdot \sin \alpha}{t \cdot l_w} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c. \quad (3.2)$$

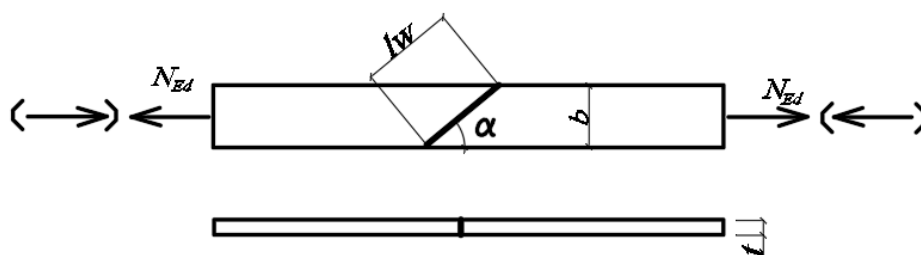


Рисунок 3.2 – Косой стыковой сварной шов

В косом шве возникают напряжения среза, которые проверяются по формуле

$$\tau = \frac{N_{Ed} \cdot \cos \alpha}{t \cdot l_w} \leq f_{ws} \cdot \gamma_c, \quad (3.3)$$

где f_{ws} – расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на сдвиг.

При действии на соединяемые сварным швом элементы изгибающего момента M_{Ed} (рисунок 3.3) напряжения в шве определяются по формуле

$$\frac{M_{Ed}}{W_y} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{t \cdot l_w^2} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (3.4)$$

где W_y – момент сопротивления.

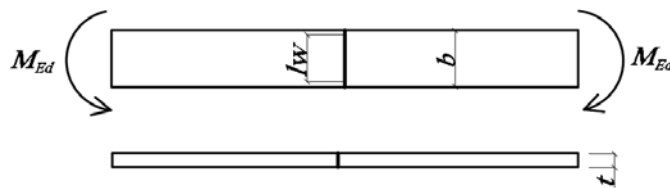


Рисунок 3.3 – К расчету стыкового сварного шва при действии изгибающего момента

При работе соединения встык на срез касательные напряжения в сварном шве (рисунок 3.4) рассчитываются по формуле

$$\tau = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \leq f_{ws} \cdot \gamma_c, \quad (3.5)$$

где V_{Ed} – расчетное усилие сдвига (поперечная сила, сила сдвига);

S – статический момент сопротивления шва;

I – момент инерции.

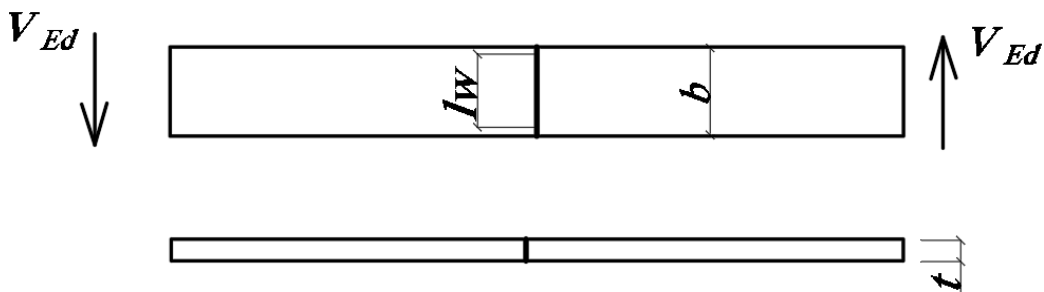


Рисунок 3.4 – К расчету стыкового сварного шва на срез

Если изгибающий момент действует на соединение совместно с продольной силой (рисунок 3.5), то напряжения в стыковом шве проверяются по формуле

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_w} + \frac{M_{Ed}}{W_y} = \frac{N_{Ed}}{t \cdot l_w} + \frac{6 \cdot M_{Ed}}{t \cdot l_w^2} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c. \quad (3.6)$$

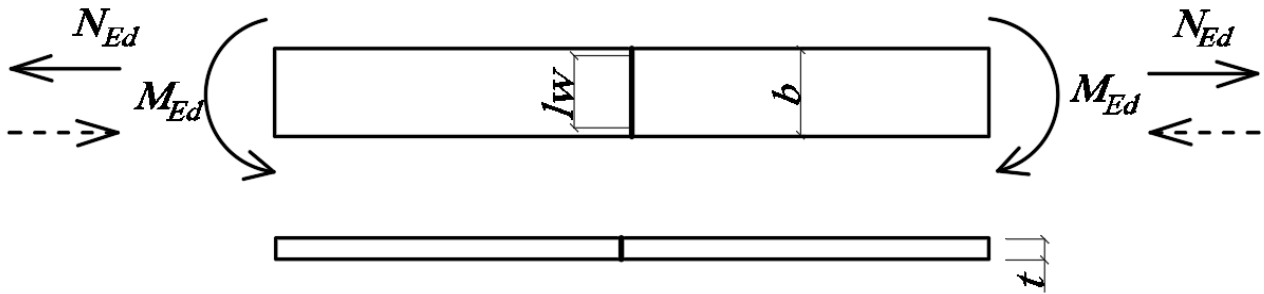


Рисунок 3.5 – К расчету стыкового сварного шва при совместном действии изгибающего момента и продольной силы

При действии изгибающего момента и поперечной силы на стыковое соединение напряжения в шве определяются по формуле

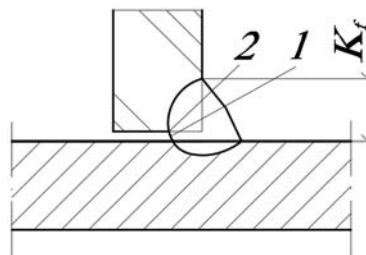
$$\sqrt{\sigma_{wx}^2 - \sigma_{wx} \cdot \sigma_{wy} + \sigma_{wy}^2 + 3 \cdot \tau_{wxy}^2} \leq 1,15 \cdot f_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (3.7)$$

где σ_{wx}, σ_{wy} – нормальные напряжения от изгиба.

Среднее касательное напряжение от срезающей силы V_{Ed} , определенное из условия равномерного распределения напряжений по сечению, $\tau_{wxy} = \frac{V_{Ed}}{t \cdot l_w}$.

Расчет угловых сварных швов

При действии продольной и поперечной силы сварные соединения с угловыми швами рассчитывают на срез (условный) по двум сечениям (рисунок 3.6).



1 – сечение по металлу шва; 2 – сечение по металлу границы сплавления

Рисунок 3.6 – Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом

Расчет сварных соединений с угловыми швами при действии расчетного осевого усилия N_{Ed} , проходящего через центр тяжести соединения, выполняют на срез (условный) по одному из двух сечений по условиям:

– при $\frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} \leq 1$ – по металлу шва (сечение 1)

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (3.8)$$

– при $\frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} > 1$ – по металлу границы сплавления (сечение 2)

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wz} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (3.9)$$

где l_w – расчетная длина швов в сварном соединении, равная суммарной длине всех его участков за вычетом 10 мм на каждом непрерывном участке шва;

k_f – высота катета шва;

β_f, β_z – коэффициенты для расчета углового шва по металлу шва и по металлу границы сплавления соответственно;

f_{wf}, f_{wz} – расчетное значение прочности угловых швов на срез (условный) по металлу шва и по металлу границы сплавления.

Для угловых швов, размеры которых установлены в соответствии с расчетом, для элементов из стали с пределом текучести до 285 МПа применяют электродные материалы, удовлетворяющие условиям:

– $f_{wf} > f_{wz}$ – при механизированной сварке;

– $1,1 f_{wz} \leq f_{wf} \leq \frac{f_{wz} \beta_z}{\beta_f}$ – при ручной сварке.

Для элементов из стали с пределом текучести более 285 МПа применяют электродные материалы, удовлетворяющие условию $f_{wz} \leq f_{wf} \leq \frac{f_{wz} \beta_z}{\beta_f}$.

Расчет сварных соединений с угловыми швами при действии расчетного изгибающего момента M_{Ed} в плоскости расположения данных швов выполняют на срез (условный) по одному из двух сечений (рисунок 3.7) по условиям:

– по металлу шва

$$\frac{M_{Ed}}{W_f \cdot f_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (3.10)$$

– по металлу границы сплавления

$$\frac{M}{W_z \cdot f_{wz} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (3.11)$$

где W_f, W_z – моменты сопротивления расчетных сечений сварного соединения по металлу шва и по металлу границы сплавления соответственно.

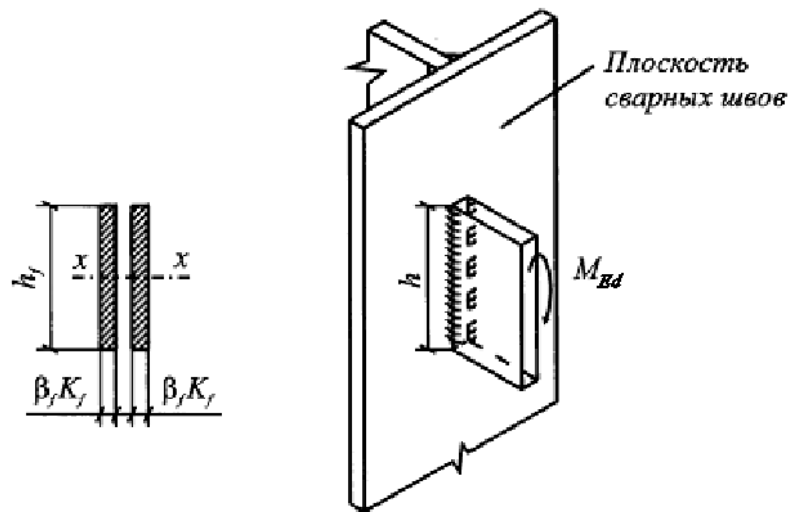


Рисунок 3.7 – К расчету угловых сварных соединений на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов

Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости расположения этих швов (рисунок 3.8) следует производить по двум сечениям по формулам:

– по металлу шва

$$\frac{M_{Ed}}{J_{fx} + J_{fy}} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \leq f_{wf} \cdot \gamma_c; \quad (3.12)$$

– по металлу границы сплавления

$$\frac{M}{J_{zx} + J_{zy}} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \leq f_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c, \quad (3.13)$$

где J_{fx} , J_{fy} – моменты инерции расчетного сечения по металлу шва относительно его главных осей;

J_{zx} , J_{zy} – то же по металлу границы сплавления;

x , y – координаты точки сварного соединения, наиболее удаленной от центра тяжести O расчетного сечения этого соединения.

При расчете сварных соединений с угловыми швами на одновременное действие продольной и поперечной сил и момента должны быть выполнены условия

$$\tau_f \leq f_{wf} \cdot \gamma_c; \quad \tau_z \leq f_{wz} \cdot \gamma_c, \quad (3.14)$$

где τ_f , τ_z – напряжения в расчетном сечении по металлу шва и по металлу границы сплавления соответственно, равные геометрическим суммам напряжений, вызываемых продольной и поперечной силами и моментом.

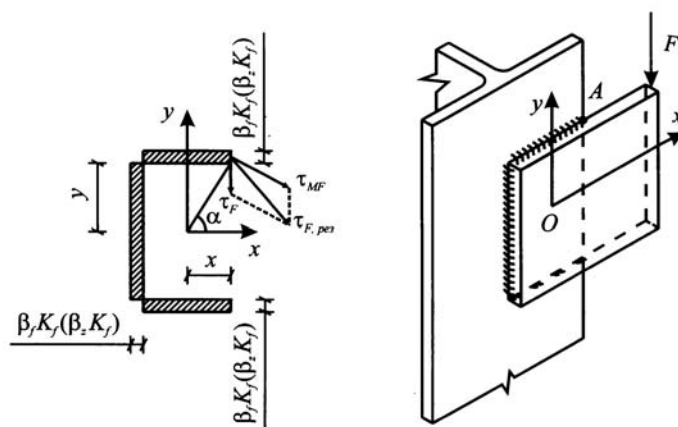


Рисунок 3.8 – К расчету угловых сварных соединений на действие момента в плоскости расположения этих швов

Примеры

Пример 1 – Рассчитать соединение встык ручной сваркой при обычных методах контроля шва двух полос из стали С255 толщиной $t = 12$ мм, шириной $b = 200$ мм на действие растягивающих сил $N_{Ed} = 30$ т.

Решение

Согласно [1, таблица А.3] для стали С255 $f_{yd} = 240$ МПа. При обычных методах контроля качества сварного шва $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 240 = 204$ МПа.

Напряжение в сварном стыковом шве определяем следующим образом:

$$\frac{N_{Ed}}{t \cdot l_w} = \frac{300000}{0,012 \cdot (0,2 - 2 \cdot 0,012)} = 142,05 \cdot 10^6 \text{ Па} =$$

$$= 142,05 \text{ МПа} < f_{wy} \cdot \gamma_c = 204 \cdot 1,0 = 204 \text{ МПа},$$

где l_w – расчетная длина шва, уменьшенная на $2t$.

Вывод: прямой стык обеспечивает прочность соединения.

Пример 2 – Какое растягивающее усилие могут выдержать листы из стали С245 сечением 250×12 мм, соединенные косым швом встык под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси при ручной сварке с обычными методами контроля качества шва?

Решение

Для стали С245 согласно [1, таблица А.3] $f_{yd} = 230$ МПа.

При расчете стыковых швов $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 230 = 195,5$ МПа.

Расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на сдвиг

определяем по формуле

$$f_{ws} = 0,58 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m}, \quad (3.15)$$

где f_{yk} – характеристическое (нормативное) значение предела текучести стали; для стали С245 $f_{yk} = 235$ МПа [1, таблица А.3];

Частный коэффициент по материалу $\gamma_m = 1,025$.

$$\text{Тогда } f_{ws} = 0,58 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 0,58 \cdot \frac{235}{1,025} = 133 \text{ МПа.}$$

$$\text{Длина сварного шва } l_w = \frac{b}{\sin \alpha} - 2t = \frac{0,25}{0,707} - 2 \cdot 0,012 = 0,33 \text{ м.}$$

Максимальное растягивающее усилие для листов

$$N_l = f_{yd} \cdot b \cdot t = 230 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 0,012 = 690000 \text{ Н} = 690 \text{ кН.}$$

Максимальное растягивающее усилие для шва

$$N_{шв} = f_{wy} \cdot \frac{l_w \cdot t}{\sin 45^\circ} = 195,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,33 \cdot 0,012}{0,707} = 1095021 \text{ Н} = 1095,02 \text{ кН.}$$

Максимальное усилие при расчете шва на сдвиг

$$N_{сдвиг} = f_{ws} \cdot \frac{l_w \cdot t}{\cos 45^\circ} = 133 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,33 \cdot 0,012}{0,707} = 744950 \text{ Н} = 744,95 \text{ кН.}$$

Вывод: расчетным является максимальное усилие для листов, т. к. расчетное осевое усилие, которое может выдержать сварное соединение, определяется по наименьшей несущей способности, в данном случае – по несущей способности листов.

Пример 3 – Определить снижение несущей способности элемента прокатного листа из стали С245 толщиной $t = 10$ мм при сварке его встык с полным проваром стенок ручной сваркой с обычными методами контроля качества шва по сравнению с целым прокатным листом.

Решение

Расчетное значение прочности по пределу текучести для прокатного листа из стали С245 для толщин от 4 до 30 мм $f_{yd} = 230$ МПа [1, таблица А.3].

Расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на растяжение, сжатие, изгиб по пределу текучести

$$f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 230 = 195,5 \text{ МПа.}$$

Снижение несущей способности

$$\frac{f_{yd} - f_{wy}}{f_{yd}} \cdot 100 \% = \frac{230 - 195,5}{230} \cdot 100 \% = 15 \%$$

Пример 4 – Рассчитать соединение встык ручной сваркой с обычными методами контроля качества шва двутавровой балки № 40 ($A_w = 72,6 \text{ см}^2$; $W_w = 953 \text{ см}^3$) из стали С255, нагруженной изгибающим моментом $M_{Ed} = 174 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и поперечной силой $V_{Ed} = 25,2 \text{ т}$.

Решение

Согласно [1, таблица А.5] для стали С255 $f_{yd} = 240 \text{ МПа}$. При обычных методах контроля качества сварного шва $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ МПа}$.

Нормальные напряжения в шве

$$\sigma_x = \frac{M_{Ed}}{W_x} = \frac{174 \cdot 10^3}{953 \cdot 10^{-6}} = 182581322 \text{ Па} = 182,58 \text{ МПа}.$$

Касательные напряжения в шве

$$\tau_x = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{252000}{72,6 \cdot 10^{-4}} = 34710743 \text{ Па} = 34,71 \text{ МПа}.$$

Приведенные напряжения в соединении (здесь $\sigma_y = 0$; $\tau_y = 0$)
 $\sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_x^2} = \sqrt{182,6^2 + 3 \cdot 34,7^2} = 193 \text{ МПа} < 1,15 f_{wy} \gamma_c = 1,15 \cdot 204 \cdot 1,0 = 235 \text{ МПа}.$

Пример 5 – Проверить монтажное соединение встык двух частей колонны сплошного сечения, выполненного из сварных двутавров со следующими характеристиками: $A_w = 283 \text{ см}^2$; $W_w = 7980 \text{ см}^3$. Сталь С255. Колонна нагружена сжимающей силой $N_{Ed} = 425 \text{ т}$ и изгибающим моментом $M_{Ed} = 400 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Решение

Согласно [1, таблица А.3] для стали С255 $f_{yd} = 240 \text{ МПа}$. При обычных методах контроля качества сварного шва $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ МПа}$.

Напряжения в сварном шве

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N_{Ed}}{A_w} + \frac{M_{Ed}}{W_w} = \frac{425 \cdot 10^3}{283 \cdot 10^{-4}} + \frac{400 \cdot 10^3}{7980 \cdot 10^{-6}} = 65142981 \text{ Па} = \\ &= 65,14 \text{ МПа} < f_{wy} \cdot \gamma_c = 204 \cdot 1,0 = 204 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Прочность соединения обеспечена.

Пример 6 – Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами (рисунок 3.9). Стальные полосы сечением 250×10 мм из стали С255 ($f_{yd} = 240$ МПа, $f_{uk} = 380$ МПа). Соединение воспринимает осевое усилие $N_{Ed} = 550$ кН. Сварка ручная. Электроды принять по [1, таблица Г.1].

Решение

Согласно [1, таблица Г.1] для стали с характеристическим значением предела текучести f_{yk} до 290 МПа принимаем электроды марки Э42. Тогда прочностные характеристики шва: $f_{wf} = 180$ МПа [1, таблица Г.2], $f_{wz} = 0,45 \cdot f_{uk} = 0,45 \cdot 380 = 171$ МПа [1, таблица 4].

Выбираем параметры шва по [1, таблица 40]. Принимаем положение шва при сварке нижнее; $\beta_f = 0,7$, $\beta_z = 1$.

Определяем расчетное сечение сварного шва:

$$\beta_f \cdot f_{wf} = 0,7 \cdot 180 = 126 \text{ МПа.}$$

Следовательно, расчет ведем по металлу шва. $\beta_z \cdot f_{wz} = 1 \cdot 171 = 171 \text{ МПа} > \beta_f \cdot f_{wf}$.

Расчетная суммарная длина швов в данном случае

$$\sum l_f = 2(25 - 1) = 48 \text{ см.}$$

Требуемый катет шва

$$k_f = \frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot \sum l_f \cdot f_{wf}} = \frac{550 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 0,048 \cdot 180 \cdot 10^6} = 0,091 \text{ м} = 0,91 \text{ см.}$$

Принимаем катет шва $k_f = 10$ мм, длину нахлестки $5 \cdot t = 5 \cdot 10 = 50$ мм.

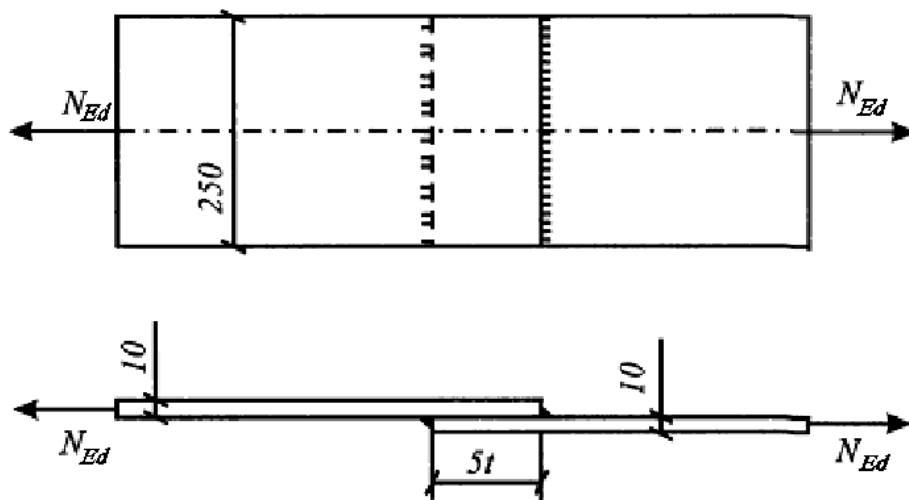


Рисунок 3.9 – К примеру 6

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Рассчитать сварное соединение встык двух листов из стали С345 шириной $b = 200$ мм, толщиной $t_1 = 12$ мм и $t_2 = 8$ мм. Расчетное усилие, действующее на соединение, $N_{Ed} = 700$ кН. Сварка ручная, с визуальным контролем качества сварного шва. Тип электрода выбрать самостоятельно.

Задача 2. Рассчитать сварное соединение двух листов шириной $b = 250$ мм и одинаковой толщиной $t = 8$ мм по несущей способности листов. Листы изготовлены из стали С255.

Задача 3. Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами стальных полос сечением 300×12 мм из стали марки С245. Соединение воспринимает расчетное усилие $N = 430$ кН. Сварка ручная. Необходимо выбрать тип электрода, установить катет шва и определить длину нахлестки.

4 Конструирование и расчет болтовых соединений

Расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом, в зависимости от вида напряженного состояния определяют по следующим формулам:

– при работе на срез

$$N_{bs} = f_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (4.1)$$

– при работе на смятие

$$N_{bp} = f_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (4.2)$$

– при работе на растяжение

$$N_{bt} = f_{bt} \cdot A_{b,n} \cdot \gamma_c, \quad (4.3)$$

где f_{bs}, f_{bp}, f_{bt} – расчетные значения прочности одноболтовых соединений срезом, смятию и растяжению соответственно;

d_b – наружный диаметр стержня болта;

A_b и $A_{b,n}$ – соответственно площадь сечения стержня болта брутто и резьбовой части нетто; принимают по [1, таблица Г.9];

Σt – наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении;

n_s – число расчетных срезов одного болта;

γ_b – коэффициент условий работы соединения; определяют по [1, таблица 42] и принимают не более 1,0;

γ_c – коэффициент условий работы конструкций и элементов; определяют по [1, таблица Б.1].

При действии на болтовое соединение осевой силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение расчетного осевого усилия N_{Ed} меж-

ду болтами принимают равномерным. В этом случае количество болтов в соединении определяют по формуле

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}}, \quad (4.4)$$

где $N_{b,min}$ – наименьшее из значений N_{bs}, N_{bp}, N_{bt} , определенных по формулам (4.1)–(4.3).

При действии на болтовое соединение момента, вызывающего сдвиг соединяемых элементов, распределение усилий на болты принимают пропорционально расстоянию от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта.

Расчетное усилие в наиболее нагруженном болте $N_{b,max,Ed}$ не должно превышать меньшего из значений N_{bs} или N_{bp} , вычисленных по (4.1) и (4.2).

При одновременном действии на болтовое соединение осевого усилия и момента, действующих в одной плоскости и вызывающих сдвиг соединяемых элементов, болты проверяют на равнодействующее усилие. В наиболее нагруженном болте оно не должно превышать меньшего из значений N_{bs} или N_{bp} , вычисленных по (4.1) и (4.2).

Фрикционные соединения (на болтах с контролируемым натяжением)

Фрикционные соединения, в которых усилия передаются через трение, возникающее по соприкасающимся поверхностям соединяемых элементов вследствие натяжения высокопрочных болтов, применяют:

- в конструкциях из стали с характеристическим значением предела текучести более 375 Н/мм² и непосредственно воспринимающих подвижные, вибрационные и другие динамические нагрузки;
- в многоболтовых соединениях, к которым предъявляются повышенные требования в отношении ограничения деформативности.

Расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, определяют по формуле

$$Q_{bh} = \frac{f_{bh} \cdot A_{b,n} \cdot \mu}{\gamma_h}, \quad (4.5)$$

где f_{bh} – расчетное значение прочности на растяжение высокопрочного болта;

μ – коэффициент трения, принимаемый 0,58 – при дробеметной или дробеструйной обработке двух поверхностей дробью без консервации; 0,42 – при газопламенной обработке двух поверхностей без консервации; 0,35 – при обработке двух плоскостей стальными щетками без консервации; 0,25 – без обработки поверхности;

γ_h – коэффициент, принимаемый по [1, таблица 43].

При действии на фрикционное соединение продольной силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение расчетного осевого усилия N_{Ed} , вызывающее сдвиг соединяемых элементов, между болтами принимают равномерным. В этом случае количество болтов в соединении определяют по формуле

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c}, \quad (4.6)$$

где k – количество плоскостей трения соединяемых элементов;

γ_b – коэффициент условий работы фрикционного соединения, зависящий от количества n болтов, необходимых для восприятия расчетного усилия; принимают равным:

- 0,8 при $n < 5$;
- 0,9 при $5 \leq n < 10$;
- 1,0 при $n \geq 10$.

Расчетное значение прочности на растяжение высокопрочных болтов f_{bh} классов прочности не ниже 10.9 определяют по формуле

$$f_{bh} = 0,7 \cdot f_{buk}, \quad (4.7)$$

где f_{buk} – характеристическое значение предела прочности стали болтов; принимают по [1, таблица Г.8].

Расчет на прочность соединяемых элементов, ослабленных отверстиями во фрикционном соединении, выполняют с учетом того, что половина осевого усилия, приходящегося на каждый болт, передана силами трения. При этом проверку ослабленных сечений выполняют при подвижных, вибрационных и других динамических нагрузках – по площади сечения нетто A_{net} ; при статических нагрузках – по площади сечения брутто A (при $A_{net} \geq 0,85A$) или по условной площади $A_{ef} = 1,18A_{net}$ (при $A_{net} < 0,85A$).

Примеры

Пример 1 – Запроектировать стык листов сечением 500×12 мм из стали С245 с ($f_{yd} = 230$ МПа; $f_{uk} = 370$ МПа). На стык действует растягивающее усилие $N_{Ed} = 1000$ кН. Стык запроектировать симметричным с двумя накладками толщиной $t = 8$ мм каждая (рисунок 4.1). Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1,0$; коэффициент условий работы соединения $\gamma_b = 1,0$. Стык запроектировать в двух вариантах: на болтах класса точности А и на высокопрочных болтах.

Решение

Вариант 1.

Стык осуществляем на болтах класса точности А диаметром $d_b = 20$ мм класса прочности 5.8, имеющих $f_{bs} = 210$ МПа [1, таблица Г.5]. Для стали

с $f_{uk} = 370$ МПа по [1, таблица Г.6] $f_{bp} = 580$ МПа. Для болтов класса точности А диаметр отверстия $d = d_b$.

Определяем расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом:
– на срез

$$N_{bs} = f_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 210 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 = 131880 \text{ Н} = 131,88 \text{ кН};$$

– на смятие листа

$$N_{bp} = f_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 580 \cdot 10^6 \cdot 0,02 \cdot 0,012 \cdot 1 \cdot 1 = 139200 \text{ Н} = 139,2 \text{ кН},$$

где $\Sigma t = t_l = 12$ мм, т. к. $t_{накл} = 2 \cdot 8 = 16 \text{ мм} > t_l = 12 \text{ мм}$.

Количество болтов на полунакладке рассчитываем следующим образом:

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}} = \frac{1000}{131,88} = 7,58 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по четыре болта в каждом (рисунок 4.1).

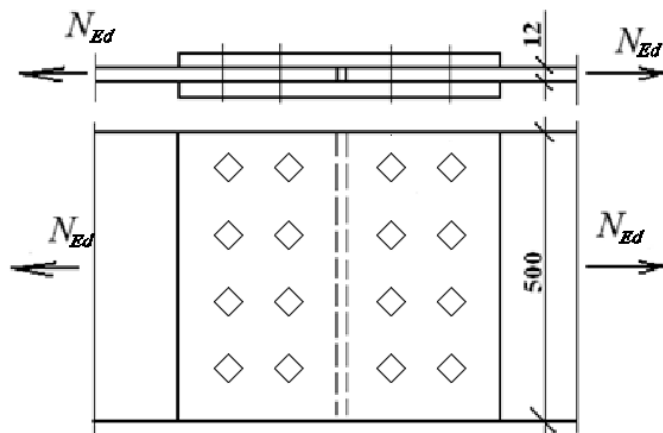


Рисунок 4.1 – К примеру 1

Проверим ослабленное сечение листа

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{net}} = \frac{1000}{0,012 \cdot (0,5 - 4 \cdot 0,02)} = 198412698 \text{ Па} = 198,412 \text{ МПа} < f_{yd} = 230 \text{ МПа}.$$

Вариант 2.

Осуществляем тот же стык на высокопрочных болтах $d_b = 20$ мм из стали 40Х с $f_{bh} = 755$ МПа при газопламенной обработке двух поверхностей без консервации.

По [1, таблица 43] $\gamma_h = 1,12$; количество плоскостей трения соединяемых элементов $k = 2$; коэффициент условий работы фрикционного соединения, зависящий от количества n болтов, необходимых для восприятия расчетного усилия примем равным $\gamma_b = 0,9$.

Для высокопрочных болтов диаметр отверстия $d = d_b$.

Расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, определяют по формуле

$$Q_{bh} = \frac{f_{bh} \cdot A_{b,n} \cdot \mu}{\gamma_h} = \frac{755 \cdot 10^6 \cdot 2,45 \cdot 10^{-4} \cdot 0,42}{1,12} = 69365,63 \text{ Н.}$$

Вычисляем количество болтов на полунакладке:

$$n = \frac{N_{Ed}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c} = \frac{1000}{69,365 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 1} = 8 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по четыре болта в каждом.

Для проверки несущей способности листа определяем расчетную площадь его ослабленного сечения. Площадь сечения листа:

- брутто $A = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ см}^2$;
- нетто $A_{net} = 1,2 \cdot (50 - 4 \cdot 2,0) = 50,4 \text{ см}^2$.

Отношение площадей $\frac{A_{net}}{A} = \frac{50,4}{60} = 0,84 < 0,85$.

Тогда определяем условную площадь $A_{ef} = 1,18 \cdot A_{net} = 1,18 \cdot 50,4 = 59,47 \text{ см}^2$.

Проверим ослабленное сечение листа по условной площади:

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{ef}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{59,47 \cdot 10^{-4}} = 1681520009 \text{ Па} = 168,152 \text{ МПа} < f_{yd} = 230 \text{ МПа.}$$

Пример 2 – Рассчитать прикрепление верхнего пояса стропильной фермы к колонне на болтах (рисунок 4.2). Растягивающее расчетное усилие в поясе $N_{Ed} = 150 \text{ кН}$; материал конструкций и болтов – сталь С245. Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1,0$.

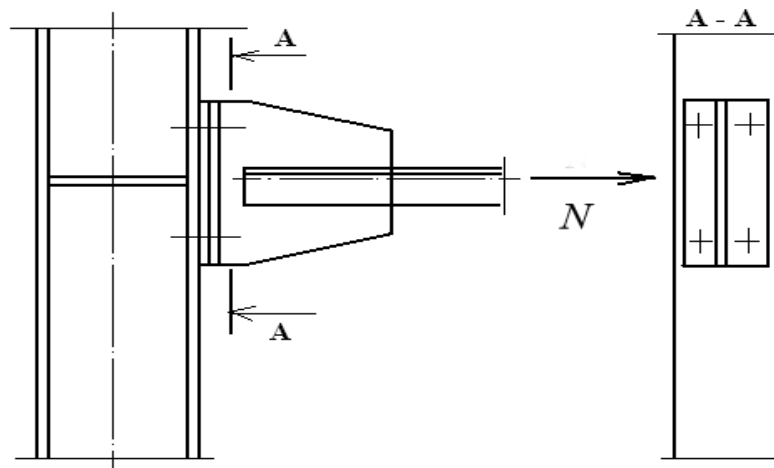


Рисунок 4.2 – Схематичное изображение соединения верхнего пояса стропильной фермы к колонне к примеру 2

Решение

Принимаем болты диаметром $d_b = 20$ мм, класса точности А, класса прочности 5.6, имеющих $f_{bt} = 225$ МПа [1, таблица Г.5], $A_{b,n} = 2,45$ см².

Число болтов, необходимое для прикрепления пояса,

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}},$$

где

$$N_{b,min} = N_{bt} = f_{bt} \cdot A_{b,n} \cdot \gamma_c = 225 \cdot 10^6 \cdot 2,45 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 55125 \text{ Н.}$$

Тогда

$$n = \frac{150000}{55125} = 2,72 \text{ шт.}$$

Принимаем четыре болта диаметром $d_b = 20$ мм (для симметричной конструкции).

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Рассчитать соединение двух листов с помощью накладок сечением 600×16 мм из стали С255. На стык действует растягивающее усилие $N_{Ed} = 1000$ кН. Стык запроектировать симметричным с двумя накладками толщиной $t = 10$ мм каждая. Коэффициент работы конструкции $\gamma_c = 1,0$. Стык запроектировать на болтах класса точности А, класса прочности 5.8.

Задача 2. Рассчитать соединение двух листов по условию задачи 1. Стык запроектировать на высокопрочных болтах.

5 Конструирование и расчет стыка балки на высокопрочных болтах

Стыки балок могут быть заводскими и монтажными. Монтажные стыки выполняют для балок большой длины. На заводе-изготовителе производят отправочные марки, которые перевозят на строительную площадку, где и выполняют укрупнительную сборку конструкции.

Стыки балок могут быть сварными и на болтах. В последнее время стыки балок выполняют на высокопрочных болтах взамен сварного соединения. Основным преимуществом такого соединения является отсутствие начальных и остаточных напряжений; кроме того, для его устройства такого соединения не требуется высококвалифицированной рабочей силы. Однако болтовые соединения более металлоемкие и трудоемкие в изготовлении.

При выполнении стыка на высокопрочных болтах стыки стенки и поясов

перекрывают накладками, которые крепятся высокопрочными болтами. Несущая способность болта зависит от способов натяжения болтов и обработки соединяемых поверхностей.

Пример расчета стыка балки на высокопрочных болтах

Рассчитать монтажный стык балки на накладках с использованием высокопрочных болтов. Сечение балки представлено на рисунке 5.1. Материал балки – листовая сталь С255 ($f_{yd} = 240$ МПа). Расчетный момент в балке $M_{Ed,max} = 3427$ кН·м. Пролет балки $l = 12$ м. Стык проектируем на расстоянии $l_1 = 0,5l$.

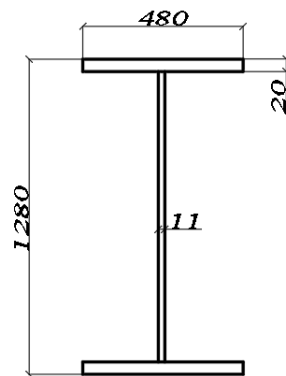


Рисунок 5.1 – Исходное сечение балки

Максимальный расчетный момент в балке $M_{Ed,max} = 342700$ кН·см. Распределим этот момент между стенкой и поясами балки. Момент инерции всего двутавра $I = 936822$ см⁴, момент инерции стенки $I_w = 174774$ см⁴, тогда доля момента, приходящаяся на стенку,

$$M_{Ed,w} = M_{Ed,max} \cdot \frac{I_w}{I}. \quad (5.1)$$

$$M_{Ed,w} = 342700 \cdot \frac{174774}{936822} = 63934,29 \text{ кН·см.}$$

Доля момента, приходящаяся на пояса,

$$M_{Ed,f} = 342700 - 63934,29 = 278765,71 \text{ кН·см.}$$

Стык стенки и пояса рассчитываются отдельно, каждый на свою долю момента.

Расчет стыка полки балки

Стык полок перекрываем накладками толщиной 11 мм. Ширину первой накладки принимаем равной ширине полки балки. Необходимые зазоры между накладками и их размеры представлены на рисунке 5.2.

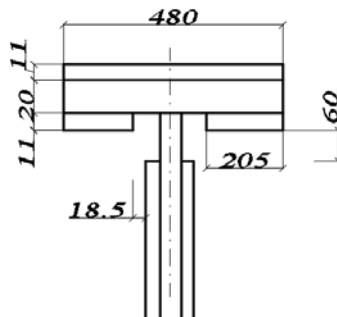


Рисунок 5.2 – К определению размеров накладок

Определим площадь поперечного сечения накладок в стыке, которая должна быть больше поперечного сечения пояса балки:

$$A_{\text{накл}} = 48 \cdot 1,1 + 2 \cdot 20,5 \cdot 1,1 = 97,9 \text{ см}^2 > A_f = 96 \text{ см}^2.$$

Раскладываем момент, приходящийся на пояса, на пару сил:

$$N_{Ed,f} = \frac{M_{Ed,f}}{h_0} = \frac{278765,71}{126} = 2212 \text{ кН},$$

где h_0 – расстояние между осями поясов.

Для определения необходимого количества болтов принимаем: способ обработки соединяемых поверхностей – газопламенный без консервации; по [1, таблица 43] $\gamma_h = 1,12$; $d_b = 24$ мм ($A_{b,n} = 3,53 \text{ см}^2$) из стали 40Х с $f_{bh} = 755 \text{ МПа}$.

Расчетное усилие, воспринимаемое одной поверхностью трения одного болта,

$$Q_{bh} = \frac{755 \cdot 10^6 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 0,42}{1,12} = 99943 \text{ Н}.$$

Необходимое число болтов в стыке

$$n = \frac{N_{Ed,f}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c} = \frac{2212 \cdot 10^3}{99943 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1} = 11,06,$$

где k – количество поверхностей трения, в нашем примере $k = 2$;

γ_b – коэффициент условий работы болтового соединения $\gamma_b = 1$. При количе-

стве болтов свыше 10 равен 1.

Принимаем четное количество болтов $n = 12$.

Болты размещаем с каждой стороны на расстоянии согласно [1, таблица 41].

Края накладок могут иметь скос, соответствующий размещению болтов. Мы применим прямоугольную накладку с тремя рядами болтов по четыре в каждом.

Расчет стыка стенки балки

Стыковые накладки на стенке принимаем равными толщине стенки балки – 11 мм, расстояние между накладками полок и стенки – 24 мм (рисунок 5.3). Расстояние от края накладки до центра ближайшего болта принимаем равным 60 мм. Расстояние между верхними и нижними болтами $a_1 = 1050$ мм.

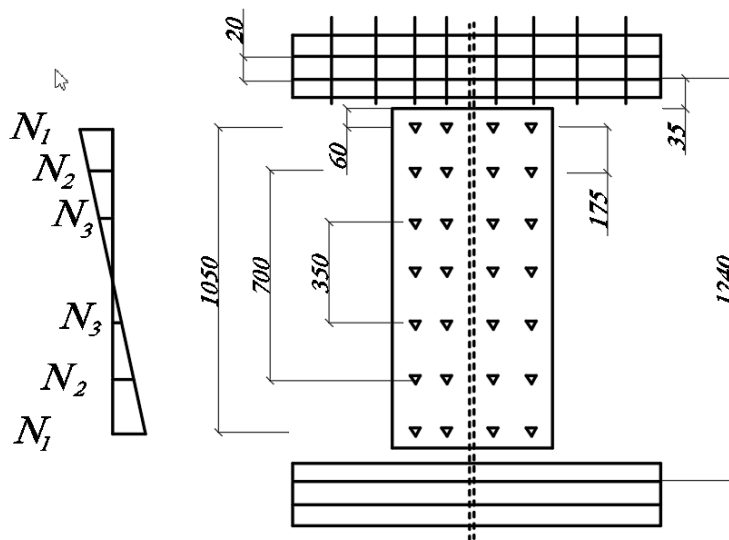


Рисунок 5.3 – Стык стенки главной балки

Момент, приходящийся на стенку балки, $M_{Ed,w} = 63934,29$ кН·см. Этот момент уравнивается суммой внутренних пар усилий, действующих на болты, расположенные на стыковой накладке стенки, $N_i \cdot a_i$:

$$M_{Ed,w} = \sum N_i \cdot a_i = mN_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 + \dots, \quad (5.2)$$

где m – число вертикальных рядов болтов по одну сторону от стыка стенки. Для сокращения ширины накладки принимают число рядов $m = 2$;

N – усилия, воспринимаемые парами болтов;

a – расстояния между парами болтов, симметрично расположенными относительно оси x .

Примем для стыка стенки те же болты, те же способы обработки поверхностей, что и для стыка поясов.

Для определения необходимого количества болтов вычисляем коэффициент α .

$$\alpha = \frac{M_{Ed,w}}{m \cdot k \cdot y_{\max} \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_b}, \quad (5.3)$$

где $y_{\max}$ – расстояние между крайними болтами, симметрично расположенными относительно оси x в метрах ($y_{\max} = a_{\max}$).

$$\alpha = \frac{639,34}{2 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 99,943 \cdot 1} = 1,52.$$

По таблице 5.1 определяем необходимое количество болтов в накладке стенки.

Таблица 5.1 – Коэффициенты стыка стенки балки

Число рядов по вертикали k	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент α	1,40	1,55	1,71	1,87	2,04	2,20	2,36

При $\alpha = 1,52$ принимаем семь рядов болтов вдоль накладки стенки, при нечетном количестве горизонтальных рядов болтов центральный ряд попадает на нейтральную ось балки.

Расстояние между центрами болтов

$$\frac{\alpha_{\max}}{k-1} = \frac{1050}{7-1} = 175 \text{ мм.}$$

Примем семь болтов и шесть расстояний между ними (см. рисунок 5.3). Компонуем стык, размещая болты с одинаковым шагом по накладке, и проверяем прочность наиболее нагруженного болта:

$$N_{b,\max} = \frac{M_{Ed,w} \cdot \alpha_{\max}}{m \cdot k \cdot (\sum a_i^2)} = \frac{639,34 \cdot 1,05}{2 \cdot 2 \cdot (1,05^2 + 0,7^2 + 0,35^2)} = 97,86 \text{ кН} < Q_{bh} = 99,943 \text{ кН.}$$

Прочность самого нагруженного болта обеспечена.

Если $N_{b,\max} > Q_{bh}$, то следует добавить еще один горизонтальный ряд болтов, перекомпоновать стык (соблюдая правила размещения болтов) и вновь проверить нагрузку на самый нагруженный болт.

6 Проверка прочности стыков балки

Проверку прочности стыков балки определим на основании исходных данных, изложенных в примере раздела 5.

Пояса балки, ослабленные отверстиями, при выполнении стыка на высокопрочных болтах, должны быть проверены на прочность по формуле

$$\frac{N_{Ed,f,0}}{A_{ef} \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (6.1)$$

где $N_{Ed,f,0}$ – расчетное усилие, действующее в ослабленном сечении пояса;

A_{ef} – условная площадь, равная площади сечения нетто A_{net} при динамических нагрузках; при статических нагрузках – площади сечения брутто A (при $A_{net} \geq 0,85A$); при $A_{net} < 0,85A$ – $A_{ef} = 1,18A_{net}$;

f_{yd} – расчетное значение предела текучести стали;

γ_c – коэффициент условий работы конструкций и элементов; определяют по [1, таблица Б.1].

Расчетное усилие, действующее в ослабленном сечении пояса,

$$N_{Ed,f,0} = N_{Ed,f} - N_{Ed,f} \cdot 0,5 \frac{n_0}{n}, \quad (6.2)$$

где $N_{Ed,f}$ – усилие, приходящееся на горизонтальные накладки для одного пояса;

n_0 – число болтов в сечении пояса, ослабленного отверстиями;

n – число болтов в соединении по одну сторону стыка пояса.

Стенка балки, ослабленная отверстиями, должна быть проверена на прочность по формуле

$$\sigma = \frac{M_{Ed,w,0}}{W_{w,n}} \leq f_{yd} \cdot \gamma_c, \quad (6.3)$$

где $M_{Ed,w,0}$ – расчетное значение изгибающего момента, действующего в ослабленном сечении стенки;

$W_{w,n}$ – момент сопротивления стенки нетто, ослабленной отверстиями.

Расчетное значение изгибающего момента, действующего в ослабленном сечении стенки,

$$M_{Ed,w,0} = M_{Ed,w} - M_{Ed,w} \cdot \frac{0,5}{m}, \quad (6.4)$$

где $M_{Ed,w}$ – момент, приходящийся на стенку балки;

m – число болтов в крайнем ряду по одну сторону стыка в накладке.

Пример расчета прочности стыков балки

Проверку прочности стыков полки и стенки балки определим на основании исходных данных, изложенных в примере раздела 5. Стык пояса осуществлен при помощи прямоугольной накладки с тремя рядами болтов по четыре в каждом.

Площадь сечения брутто одной полки $A = 96 \text{ см}^2$.

Площадь сечения нетто одной полки

$$A_{net} = t_f \cdot (b_f - n \cdot d) = 2 \cdot (48 - 3 \cdot 2,4) = 69,12 \text{ см}^2,$$

где n – число болтов в поперечном сечении одной полки. В данном примере $n = 3$.

Так как $A_{net} = 69,12 \text{ см}^2 < 0,85A = 0,85 \cdot 96 = 81,6 \text{ см}^2$, следовательно, дальнейший расчет ведем по условной площади

$$A_{ef} = 1,18A_{net} = 1,18 \cdot 69,12 = 81,56 \text{ см}^2.$$

Тогда

$$N_{Ed,f,0} = N_{Ed,f} - N_{Ed,f} \cdot 0,5 \frac{n_0}{n} = 2212 - 2212 \cdot 0,5 \frac{3}{12} = 1935,5 \text{ кН}.$$

Выполним проверку прочности ослабленного сечения полки:

$$\frac{N_{Ed,f,0}}{A_{ef} \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c} = \frac{1935,5 \cdot 10^3}{81,56 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,989 < 1.$$

Прочность соединяемых элементов полок обеспечена.

Момент инерции стенки нетто

$$I_{w,net} = I_w - 2 \cdot d \cdot t_w \cdot \sum \left(\frac{a_i}{2} \right)^2 = 174774 - 2 \cdot 2,4 \cdot 1,1 \cdot ((0,5 \cdot 35)^2 + (0,5 \cdot 70)^2 + (0,5 \cdot 105)^2) = 153852 \text{ см}^4.$$

Так как $\frac{I_{w,net}}{I_w} = \frac{153852}{174774} = 0,88 > 0,85$, следовательно, расчет ведем по площади сечения брутто, для которого $I_w = 174774 \text{ см}^4$.

площади сечения брутто, для которого $I_w = 174774 \text{ см}^4$.

$$W_{w,n} = \frac{2I_w}{h_w} = \frac{2 \cdot 174774}{124} = 2818,9 \text{ см}^3.$$

Расчетное значение изгибающего момента, действующего в ослабленном сечении стенки,

$$M_{Ed,w,0} = 639,34 - 639,34 \cdot \frac{0,5}{2} = 479,51 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Проверка прочности стенки

$$\sigma = \frac{479,51 \cdot 10^3}{2818,9 \cdot 10^{-6}} = 170,1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 170,1 \text{ МПа} < 240 \cdot 1 = 240 \text{ МПа}.$$

Прочность стенки в ослабленном сечении обеспечена.

Список литературы

1 Стальные конструкции (с поправкой) : СП 5.04.01–2021. – Введ. 01.10.2021 (с отменой СНиП II-23–81*). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 153 с.

2 **Кудишин, Ю. И.** Металлические конструкции: учебник / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева; под ред. Ю. И. Кудишина. – 13-е изд., испр. – М. : Академия, 2011. – 688 с.

3 **Горев, В. В.** Металлические конструкции: учеб. пособие для строительных вузов: в 3 т. Т. 1: Элементы стальных конструкций / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов; под ред. В. В. Горева. – М. : Высш. шк., 2004. – 551 с.

4 **Нехаев, Г. А.** Металлические конструкции в примерах и задачах: учеб. пособие / Г. А. Нехаев, З. А. Захарова. – М. : АСВ, 2010. – 128 с.